

## ارزیابی لرزه‌ای حرکت گهواره‌های دیوار برشی

محمد افشاری

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[m.afshari@iiees.ac.ir](mailto:m.afshari@iiees.ac.ir)

حدیثه محمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[h.mohammadi@iiees.ac.ir](mailto:h.mohammadi@iiees.ac.ir)

عبدالرضا سروفقدم

دانشیار، عضو هیئت علمی پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[moghadam@iiees.ac.ir](mailto:moghadam@iiees.ac.ir)

کلیدواژه‌ها: دیوار برشی بتنی، حرکت گهواره‌ای، برکنش فونداسیون، تحلیل قاب بتنی

### چکیده

دیوارهای برشی به صورت گسترده‌ای در ساختمان‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که این دیوارها تحت تأثیر زلزله‌های شدید قرار می‌گیرند، بلند شدگی و حرکات نوسانی را می‌توان در پایه‌ی این سیستم مشاهده کرد. در نتیجه، فونداسیون این سیستم تحت شرایط خاصی از روی زمین بلند می‌شود. بلند شدگی در فونداسیون، خسارت‌های وارد شده به دیوار برشی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Kyohei Mori et al, 2008). این در حالی است که چرخش اضافی در دیوار برشی باعث ایجاد خسارت‌های قابل توجهی در قاب‌های مجاور می‌شود. به منظور مطالعه‌ی عملکرد بلندشدگی در دیوارهای برشی، یک تحلیل تاریخچه زمانی بر روی یک قاب سه دهانه با یک دهانه دیوار برشی، یک بار در حالتی که تکیه‌گاه دیوار برشی گیردار باشد و بار دیگر با حرکت گهواره‌ای دیوار برشی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مطالعه‌ی این مکانیسم رفتاری، تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 بر روی قاب اعمال شده است. در این مقاله عملکرد رفتاری دیوار برشی با اعمال تغییراتی در شرایط تکیه‌گاهی و ضخامت دیوار برشی، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مقایسه، پارامترهای: نیروی محوری در ستون طبقه اول، تغییر مکان بام و شتاب افقی بیشینه‌ی طبقات مدنظر است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، حرکت گهواره‌ای دیوار افزایش قابل ملاحظه‌ای در تغییر مکان بام ایجاد می‌کند ولی بیشینه شتاب افقی موجود در طبقات را کاهش می‌دهد. نیروی محوری موجود در ستون‌های طبقه‌ی اول نیز تغییر زیادی ندارند.

### مقدمه

دیوار برشی به صورت گسترده‌ای در طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که دلیل این موضوع افزایش سختی و ظرفیت برشی در مقابل نیروهای لرزه‌ای جانبی است. از سختی دیوار برشی در مقاوم‌سازی نیز استفاده‌های زیادی می‌شود، از این رو، میزان سختی این دیوارها، عملکرد آن‌ها در کنار دستگاه‌های سازه‌ای دیگر نظیر قاب بتنی، میزان خسارت ایجاد شده در آن، که موجب کاهش سختی سازه می‌شود، نیاز به بررسی بیشتری دارد. در زلزله‌های شدید، به طور معمول بلند شدگی‌های کوچکی در تکیه‌گاه‌های دیوار برشی مشاهده می‌شود که در برخی موارد با برکنش در سازه همراه است و در اصطلاح به آن حرکت گهواره‌ای دیوار برشی می‌گویند. حرکت گهواره‌ای دیوار برشی به دلیل چرخش در تکیه‌گاه‌های دیوار، تغییر شکل‌های بزرگی را به قاب مجاور تحمیل می‌کند، در مقایسه با حالتی که دیوار برشی گیردار باشد، در هنگام حرکت گهواره‌ای قاب‌های مجاور به ناچار نیروها و آسیب‌های بیشتری را تحمل می‌کنند (Gajan 2006).

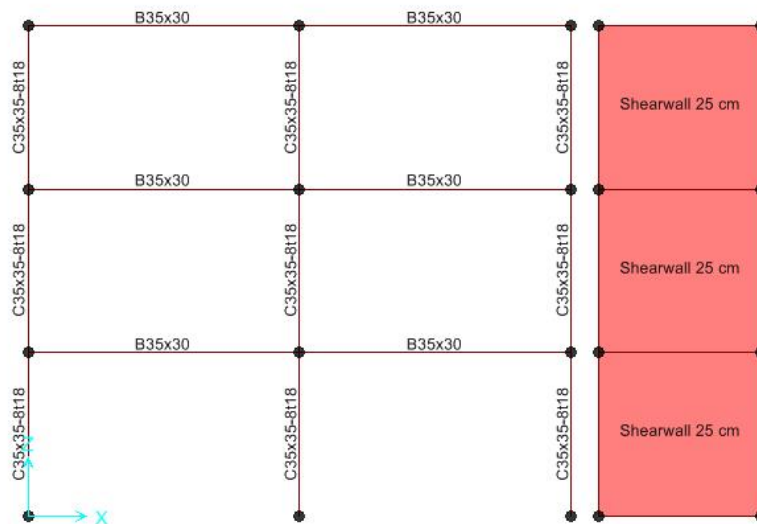
هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد یک دیوار برشی با حرکت گهواره‌ای و تأثیرات آن در سطح عملکرد سازه، نیروهای توزیع شده در اعضا و تأثیر مشخصات دیوار در تغییر پارامترهای موجود است. بر اساس مدل‌سازی انجام شده، دو مرحله‌ی بارگذاری روی سازه اعمال می‌شود. در مرحله‌ی اول پایه‌های دیوار برشی به صورت کامل گیردار هستند و در مرحله‌ی دوم به دیوار برشی اجازه‌ی حرکت گهواره‌ای داده می‌شود. در هر دو



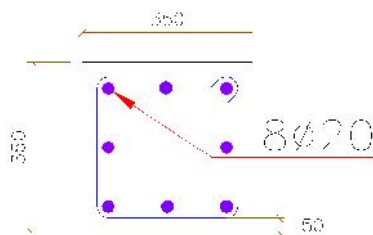
مرحله، سازه تحت یک شتاب‌نگاشت تحریک شده و در نهایت تغییر مکان طبقه‌ی بام، بیشینه شتاب سازه در طبقات و نیروی محوری اعضا در ستون‌های موجود در طبقه‌ی اول در دو قاب مقایسه می‌شوند.

## مشخصات مدل‌سازی

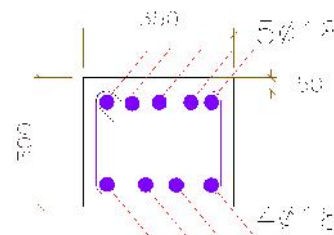
شکل ۱ ساختار مدل تحلیلی و شکل ۲ پیکربندی مقاطع و ترکیب قرارگیری آرماتورها را نشان می‌دهد، واحدها در این شکل برحسب میلی‌متر هستند. مدل تحلیلی در نظر گرفته شده یک قاب سه طبقه از یک ساختمان مسکونی است که با استفاده از آیین‌نامه‌ی ایران طراحی شده است. جدول ۳ مشخصات طراحی سازه را نشان می‌دهد. این ساختمان با شدت لرزه خیزی خیلی زیاد، بر روی خاک نوع ۳ طراحی شده است. سیستم لرزه بر در این ساختمان ترکیب قاب خمشی بتنی متوسط و دیوار برشی است. این مدل دارای یک دهانه دیوار برشی است که در تمام ارتفاع قاب به آن مقید شده است. این قاب در مقیاس واقعی طراحی شده، به این صورت که ارتفاع تمامی طبقات ۳ متر، عرض دهانه‌های قاب بتنی ۵ متر و عرض دیوار برشی برابر ۳ متر است. مشخصات مصالح بتنی در جدول ۱ و مشخصات آرماتورهای فولادی در جدول ۲ آمده است. بارگذاری این قاب متشکل از یک بار گسترده برابر با  $3000 \text{ kg/m}$  به عنوان بار مرده و  $1000 \text{ kg/m}$  به عنوان بار زنده بر روی تیرها است. دیوار برشی موجود در مدل نیز مطابق آیین‌نامه‌ی ایران طراحی شده است و در مدل‌سازی با یک فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری کاملاً با قاب در ارتباط است به طوری فقط سختی دیوار در عملکرد قاب تأثیرگذار باشد.



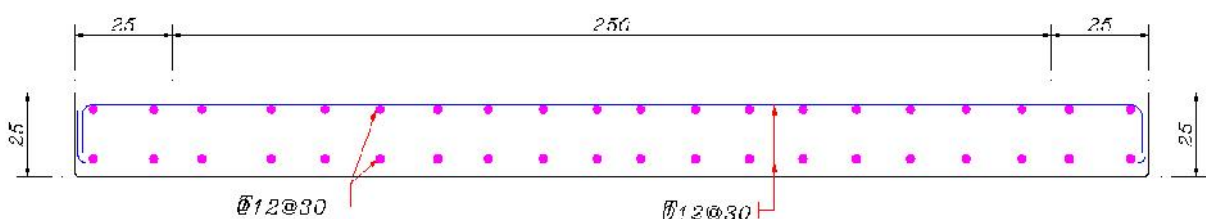
شکل ۱: پیکربندی نمونه



ب: مقطع ستون



الف: مقطع تیر



ج: مقطع دیوار برشی

شکل ۲: پیکربندی اعضا

جدول ۱: مشخصات بتن مصرفی

مدول یانگ (GPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)
۲۱.۵	۲۰.۶

جدول ۲: مشخصات فولاد مصرفی

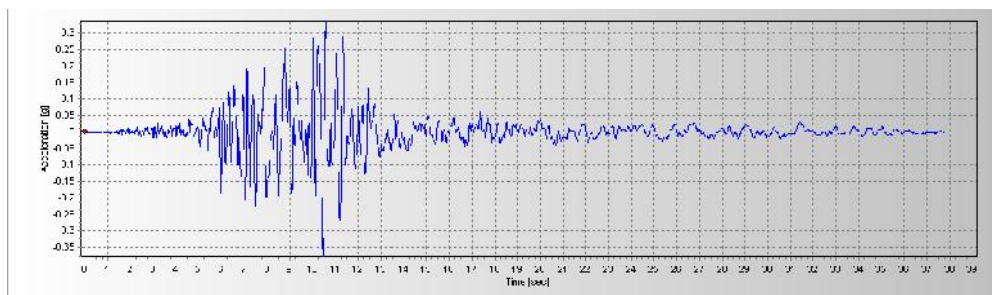
نوع فولاد	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش کششی (MPa)
S 400	۲۰۵.۹	۳۹۲.۲	۵۸۸.۴
S 300	۲۰۵.۹	۲۹۴.۲	۴۴۱.۳

جدول ۳: مشخصات طراحی سازه

متغیرها	مقدار (واحد)
ارتفاع قاب	9 (m)
ضریب رفتار	8
ضریب اهمیت	1
نسبت شتاب مبنای طرح	0.35

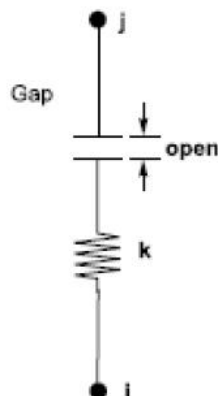
## مشخصات تحلیل

بر روی مدل مذکور تحلیل تاریخچه زمانی انجام شده و برای این تحلیل از زلزله امپریال ولی در ایستگاه السنترو استفاده شده است. بیشینه شتاب زمین در این شتاب‌نگاشت 0.38g می‌باشد. شکل ۳، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی السنترو را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: شتاب‌نگاشت زلزله‌ی السنترو

برای المان‌های موجود در قاب مجاور دیواربرشی، مفاصل پلاستیک در هر دو انتهای المان تعریف شده است. اتصالات موجود در قاب همگی به صورت صلب کامل مدل‌سازی شده‌اند. دیوار برشی موجود به صورت شل مدل‌سازی شده و در راستای X به صورت غیرخطی عمل می‌کند تا مقداری از خسارت‌های وارده به دیوار در سختی دیوار برشی دیده شود. به منظور مدل‌سازی حرکت گهواره‌ای در دیوار برشی از المان گپ استفاده شده است. شکل ۴ ساختار المان گپ را در نرم‌افزار نشان می‌دهد. ثابت فنر k در این مدل به بی‌نهایت میل می‌کند تا در شرایط فشاری عملکردی مانند تکیه‌گاه مفصلی داشته باشد. اما در کشش، امکان تغییر شکل در راستای محوری المان گپ وجود دارد و سختی در جهت محوری برابر صفر است. این المان گپ در دو طرف دهانه‌ی دیوار برشی همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، استفاده شده.



شکل ۴: المان گپ



## مرحله اول بارگذاری

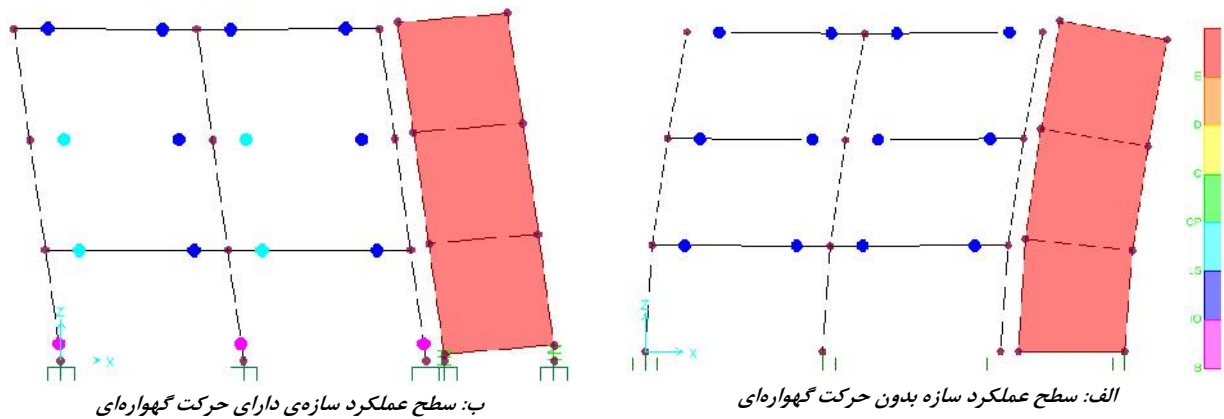
در مرحله اول بارگذاری، تکیه‌گاه دیوار برشی گیردار است، به عبارت دیگر در این مرحله به فونداسیون دیوار اجازه‌ی بلند شدگی داده نمی‌شود، در این مرحله خرابی در سازه بیشتر بر روی دیوار برشی متمرکز می‌شود. در این مرحله دیوار در خمش تسلیم شده و در برش به مرحله‌ی گسیختگی می‌رسد (Kyohei Mori et al, 2008).

## مرحله دوم بارگذاری

در مرحله دوم بارگذاری، به سیستم اجازه‌ی حرکت گهواره‌ای داده می‌شود. در این مرحله تکیه‌گاه‌های قاب تحت شرایطی از روی زمین بلند می‌شوند، برای این منظور در نرم‌افزار از المان گپ استفاده شده است. در این مرحله خسارت در دیوار محدود شده و ترک‌های بیشتری در قاب‌های مجاور به چشم می‌خورد (Kyohei Mori et al, 2008). در این مرحله، از لغزش نمونه بر روی زمین در جهت X صرف‌نظر شده است.

## نتایج تحلیل

شکل ۵ سطح عملکرد قاب با دیوار ۲۵ سانتی‌متری را در بیشترین تغییرمکان قاب در دو مرحله بارگذاری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود قاب موردنظر در مرحله اول بارگذاری سطح عملکرد ایمنی جانی را در قاب تأمین می‌کند، این امر در حالی است که تمامی مفاصل در تیرهای قاب تشکیل شده است. در مرحله دوم بارگذاری سازه تغییرمکان بیشینه بیشتری را تحمل می‌کند که موجب می‌شود سطح عملکرد قاب، پایین‌تر از حالت قبل باشد. در این مرحله قاب سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش را تأمین کرده است. در این حالت دیوار برشی نیروهای بیشتری را به اعضای قاب اعمال می‌کند و این موضوع باعث بدتر شدن شرایط در مفاصل تیرها می‌شود، همچنین به دلیل افزایش میزان تغییرمکان در قاب مفاصل در پای ستون‌های طبقه اول نیز دیده می‌شوند.

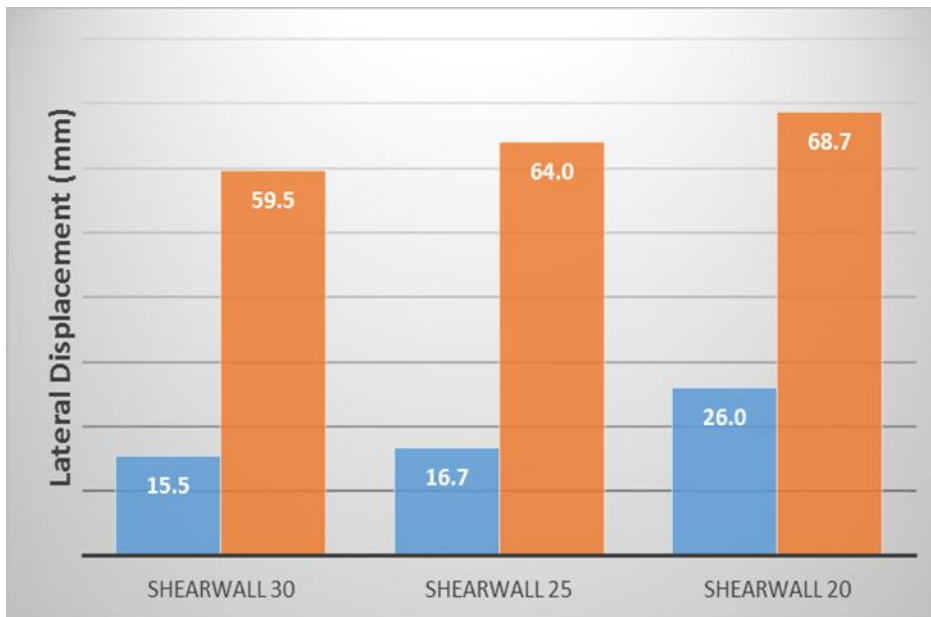


شکل ۵: سطح عملکرد سازه با دیوار ۲۵ سانتی‌متری

به منظور مقایسه‌ی عملکرد دیوار برشی و تأثیر مشخصات دیوار بر نیروهای وارد به سازه و دیگر پارامترهای موجود، هر دو مرحله‌ی بارگذاری بر روی سازه با سه ضخامت مختلف دیوار برشی اعمال شده و نتایج موردبررسی قرار گرفته است، سه ضخامت ۲۰ و ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر برای دیوار برشی مدنظر بوده و در هر حالت، پارامترهای بیشینه تغییرمکان بام، بیشینه شتاب طبقات و نیروی محوری موجود در ستون طبقه اول استخراج شده‌اند.

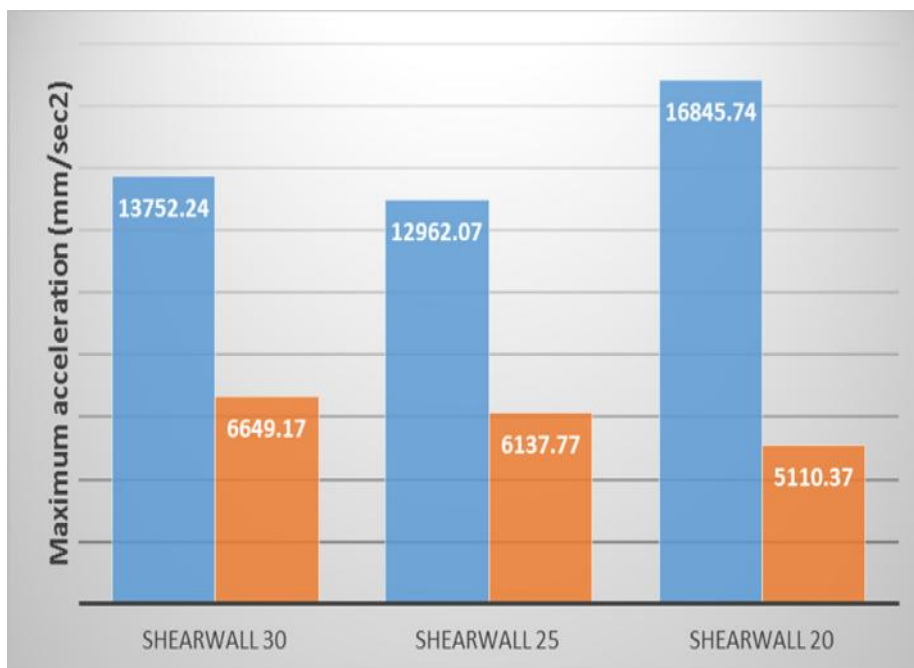
شکل ۶، بیشینه تغییرمکان بام را در سه ضخامت متفاوت دیوار برشی نشان می‌دهد. در این شکل، ضخامت دیوار برشی از چپ به راست، ۳۰، ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر است. توجه شود که در تمامی اشکال ستون‌های آبی‌رنگ مربوط به مرحله اول بارگذاری است که تکیه‌گاه‌ها در آن گیردار است و ستون‌های نارنجی‌رنگ مربوط به مرحله دوم بارگذاری یعنی حالتی که دیوار برشی اجازه حرکت گهواره‌ای را دارد، است. همه واحدهای موجود در این شکل بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

با توجه به شکل، در مرحله دوم بارگذاری به دلیل بلند شدن تکیه‌گاه‌ها، تغییر مکان‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند که این موضوع در هر سه حالت موردبررسی مشهود است و یکی از دلایل اصلی پایین آمدن سطح عملکرد در سازه است. از سوی دیگر هرچه ضخامت دیوار کاهش پیدا می‌کند، تغییرمکان سازه نیز افزایش می‌یابد زیرا بخش اعظمی از سختی قاب را سختی دیوار تشکیل می‌دهد.



شکل ۶: بیشینه تغییر مکان بام با ضخامت‌ها متفاوت دیوار برشی

شکل ۷ بیشینه شتاب افقی طبقات را در قاب نشان می‌دهد، در اینجا شتاب هر سه طبقه استخراج شده و بیشینه‌ی آن‌ها در هر مرحله در شکل آمده است، با توجه به شکل، شتاب سازه در مرحله اول در هر سه نمونه بیشتر از مرحله دوم بوده و با کاهش ضخامت، در حالتی که دیوار حرکت گهواره‌ای دارد شتاب همواره کاهش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه این است که در مرحله اول بارگذاری، بیشینه شتاب همواره در بالاترین طبقه‌ی قاب اتفاق می‌افتد و در مرحله‌ی دوم بارگذاری، بیشینه شتاب در طبقه‌ی اول قاب ثبت می‌شود.



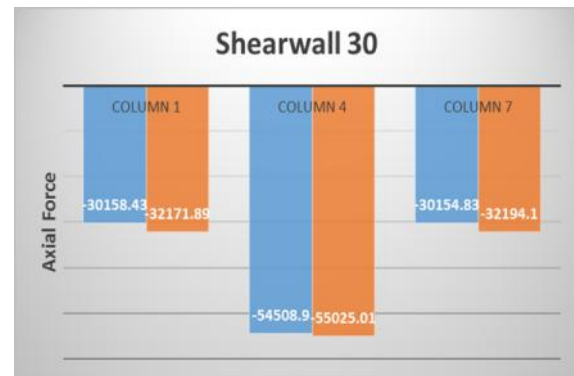
شکل ۷: بیشینه شتاب افقی طبقات در ضخامت‌های مختلف دیوار

شکل ۸ نیروی محوری موجود در ستون‌های طبقه‌ی اول را نشان می‌دهد. در این شکل ستون‌های ۱، ۴ و ۷ به ترتیب ستون‌های طبقه‌ی اول از چپ به راست می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نیروی محوری در این ستون‌ها در دو مرحله بارگذاری تفاوت زیادی ندارند و فقط به میزان کمی با وجود حرکت گهواره‌ای نیرو در آن‌ها افزایش می‌یابد. نیروی محوری در ستون وسط تقریباً دو برابر دو ستون کناری است که این موضوع به دلیل طول بارگیری ستون وسطی از بارگذاری ثقلی است. در این قاب به دلیل بارگذاری ثقلی، نیروی موجود در ستون‌ها به صورت فشاری باقی می‌ماند.





ب: نیروی محوری ستون‌های طبقه‌ی اول با دیوار ۲۵ سانتی‌متری



الف: نیروی محوری ستون‌های طبقه‌ی اول با دیوار ۳۰ سانتی‌متری



ج: نیروی محوری ستون‌های طبقه‌ی اول با دیوار ۲۰ سانتی‌متری

شکل ۸: نیروی محوری موجود ستون‌های طبقه اول

## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک قاب سه دهانه‌ی بتنی که یک دهانه‌ی آن دیوار برشی است با ویژگی‌های متفاوتی از دیوار تحلیل شده است و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. این تحلیل‌ها در مرحله‌ی اول بارگذاری با تکیه‌گاه گیردار و در مرحله‌ی دوم بارگذاری با حرکت گهواره‌ای صورت پذیرفته‌اند. ضخامت دیوار، در سه حالت ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر تغییر کرده و پارامترهای تغییرمکان بام، بیشینه شتاب طبقات و نیروی محوری موجود در ستون‌های موجود در طبقه‌ی اول مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تغییرمکان بام با حرکت گهواره‌ای به‌مراتب بیش از حالت گیردار است، همچنین تغییرمکان بام در قاب با افزایش ضخامت دیوار در هر دو حالت تکیه‌گاهی کاهش می‌یابد و این کاهش از یک آهنگ تغییرات نسبتاً ثابتی پیروی می‌کند. شتاب بیشینه طبقات، در حالت اول بارگذاری در بالاترین طبقه‌ی قاب و در مرحله‌ی دوم بارگذاری در پایین‌ترین طبقه ایجاد می‌شود. تغییر ضخامت دیوار در نتایج به‌دست‌آمده در این بخش تأثیرات بسزایی دارد.

با توجه به نیروی ثقلی موجود در قاب نیروی محوری در سازه تغییر زیادی نکرده و تغییرات ضخامت دیوار نیز این تأثیرات را افزایش نداده است.

## مراجع

Computer and Structure, 2010, structural analysis program, Sap2000, version 16.0.0, Berkeley, CA

Gajan S (2006) Physical and Numerical Modeling of Nonlinear Seismic Load-Deformation Behavior of Shallow Foundations Supporting Rocking Shear Walls, PhD Thesis, Civ. and Env. Eng. Department, University of California, Davis

Kyohei Mori, Kyohei Murakami, Masanobu Sakashita, Susumu Kono and Hitoshi Tanaka (2008) Seismic Performance of Multi-story Shearwall with an Adjacent Frame Considering Uplift of Foundation, *The 14th World Conference of Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China